

PCT

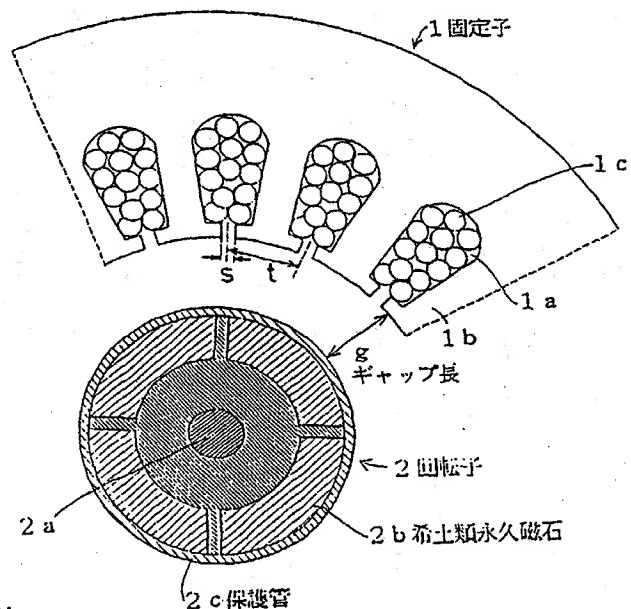
世界知的所有権機関  
国際事務局

## 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(51) 国際特許分類 5 H02K 29/00		A1	(11) 国際公開番号 WO 94/22206
		(43) 国際公開日 1994年9月29日(29.09.94)	
(21) 国際出願番号 PCT/JP94/00440 (22) 国際出願日 1994年3月18日(18. 03. 94)		(81) 指定国 CA, JP, US, 欧州特許(AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).	
(30) 優先権データ 特願平5/60726 1993年3月19日(19. 03. 93) JP 特願平5/244975 1993年9月30日(30. 09. 93) JP		添付公開書類 国際調査報告書	
(71) 出願人(米国を除くすべての指定国について) ダイキン工業株式会社(DAIKIN INDUSTRIES, LTD.)(JP/JP) 〒530 大阪府大阪市北区中崎西2丁目4番12号 梅田センタービル Osaka, (JP)			
(71) 出願人; および (72) 発明者 高橋 敷(TAKAHASHI, Isao)(JP/JP) 〒940-21 新潟県長岡市北山町4丁目463番地 Niigata, (JP)			
(72) 発明者; および (75) 発明者/出願人(米国についてのみ) 大山和伸(OOYAMA, Kazunobu)(JP/JP) 〒525 滋賀県草津市青地町700-1 Shiga, (JP) 山際昭雄(YAMAGIWA, Akio)(JP/JP) 〒569 大阪府高槻市寿町3-26-7 Osaka, (JP)			
(74) 代理人 弁理士 津川友士(TSUGAWA, Tomoo) 〒530 大阪府大阪市北区天神橋1丁目7番10号 やまとヤビル3階 Osaka, (JP)			

(54) Title : ULTRA-HIGH SPEED BRUSHLESS DC MOTOR

(54) 発明の名称 超高速ブラシレスDCモータ



## (57) Abstract

This invention provides a brushless DC motor capable of ultra-high speed revolution by setting a gap length between a stator (1) and a portion of a rotor (2) having a metallic property to at least  $N^{5/6} \cdot p^{1/8} \cdot d \cdot Kg$ .

- 1 ... stator  
g ... gap length  
2 ... rotor  
2b ... rare earth permanent magnet  
2c ... protective pipe

(57) 要約

固定子(1)と、回転子(2)の金属的性質を有する部分との間のギャップ長 $g$ を $N^{5/6} \cdot p^{1/8} \cdot d \cdot Kg$ 以上に設定して、超高速回転が可能なブラシレスDCモータを提供する。

情報としての用途のみ

PCTに基づいて公開される国際出願のパンフレット第1頁にPCT加盟国を同定するために使用されるコード

AM	アルメニア	CZ	チェッコ共和国	KP	朝鮮民主主義人民共和国	NZ	ニュー・ジーランド
AT	オーストリア	DE	ドイツ	KR	大韓民国	PL	ポーランド
AU	オーストラリア	DK	デンマーク	KZ	カザフスタン	PT	ポルトガル
BB	バルバドス	EE	エストニア	LI	リヒテンシュタイン	RO	ルーマニア
BE	ベルギー	ES	スペイン	LK	スリランカ	RU	ロシア連邦
BF	ブルキナ・ファソ	FI	フィンランド	LT	リトアニア	SD	スーダン
BG	ブルガリア	FR	フランス	LU	ルクセンブルグ	SE	スウェーデン
BJ	ベナン	GA	ガボン	LV	ラトヴィア	SI	スロベニア
BR	ブラジル	GB	イギリス	MC	モナコ	SK	スロヴァキア共和国
BY	ベラルーシ	GE	グルジア	MD	モルドバ	SN	セネガル
CA	カナダ	GN	ギニア	MG	マダガスカル	TD	チャド
CF	中央アフリカ共和国	GR	ギリシャ	ML	マリ	TG	トーゴ
CG	コンゴ	HU	ハンガリー	MN	モンゴル	TJ	タジキスタン
CH	スイス	IE	アイルランド	MR	モーリタニア	TT	トリニダード・トバゴ
CI	コート・ジボアール	IT	イタリア	MW	マラウイ	UA	ウクライナ
CM	カメルーン	JP	日本	NE	ニジェール	US	米国
CN	中国	KE	ケニア	NL	オランダ	UZ	ウズベキスタン共和国
CS	チェッコスロヴァキア	KG	キルギスタン	NO	ノルウェー	VN	ヴェトナム

## 明細書

## 発明の名称

## 5 超高速ブラシレスDCモータ

## 技術分野

この発明は超高速ブラシレスDCモータに関し、さらに詳細に言えば、

10 電機子鉄心に電機子巻線を巻回してなる電機子と永久磁石内周に回転子鉄心が嵌合されてなる回転子とを含み、1万r. p. m. を越える回転速度で回転されるブラシレスDCモータに関する。

## 背景技術

15

従来から圧縮機等の駆動源として、電氣的制御が容易であること等の利点に着目してモータが採用されている。また、モータには種々の種類のものがあるが、現状では、三相交流電源を用いて回転磁界を簡単に得ることができ、整流子を不要にできること、および堅牢、低価格、取扱

20 いの簡便さ等の利点に着目して三相誘導電動機が最も一般的に用いられている。しかし、誘導電動機は、電機子鉄心に電機子巻線を巻回しているだけでなく、回転子鉄心にも回転子巻線を巻回しており、運転時には回転子巻線にも電流が流れるので、機械損が存在しないと仮定した場合

25 出力が入力よりも減少し、余り効率を高めることができない。

この点に着目して、回転子鉄心に回転子巻線を巻回する代わりに、回

- 2 -

5 転子鉄心に永久磁石を装着して二次銅損を0にし、高い運転効率を達成できるブラシレスDCモータが提案されている。また、高い運転効率を達成できることに起因して、精密機械、圧縮機等における高速回転モータとしてブラシレスDCモータを適用することが検討されている。この場合において、ブラシレスDCモータは、運転効率を高めることが最も重視されるのであるから、固定子と回転子との間における磁束結合効率を可能な限り高めるべく、固定子と回転子との間のギャップ長が固定子内径の $1/100 \sim 1/200$ 程度に設定されている。また、高速回転に伴う永久磁石の破損を防止するために金属管が装着されている（特開平3-11950号公報参照）。

10 しかし、ブラシレスDCモータを高速回転させる場合には、固定子のスロットに起因する磁束密度変化が生じる。そして、ギャップ長が上述のように著しく小さいのであるから、回転子が磁束密度変化の影響を大きく受けて渦電流が発生し、渦電流損に起因して運転効率が低下してしまう。従来は、磁束密度変化に起因する渦電流が発生しても、上述のよう  
15 うに固定子と回転子との間のギャップ長を可能な限り小さくして磁束結合効率を高めることにより、ブラシレスDCモータの運転効率を十分に高めることができると思われていた。そして、実際に提供されているブラシレスDCモータのうち、高効率化を目的とするものは全て上述のようにギャップ長を可能な限り小さく設定してある。

20 さらに詳細に説明すると、従来のブラシレスDCモータの殆どは比較的低出力の領域で回転させるものであったため、渦電流損に起因する発熱は殆ど問題にならず、可能な限り磁束結合効率を高めることが主眼となっており、上述のようにギャップ長を可能な限り小さく設定している。また、ブラシレスDCモータを高出力化および／または高速回転化する場合  
25 には、渦電流損に起因する発熱が問題になるので、固定子のスロツ

ト開口幅を小さくし、および／またはファンの装着、冷媒の供給等による強制冷却を行なうことにより、渦電流損に起因する発熱を上回る放熱効果を達成するという対処がとられている。ここで、スロット開口幅を小さくすれば、固定子の歯部同士の間隔が小さくなるため、歯部とスロット開口部との間での磁束密度変化がなだらかになり、空間高調波成分を大幅に低減できるので、渦電流損を大幅に低減できると思われる。しかし、スロット開口幅は、固定子巻線をスロット内に収容する必要がある関係上、小さくすることには限界があり、この限界が渦電流損に起因する発熱を抑制するための限界になってしまう。もちろん、強制的に冷却する場合にも、ファンの性能、冷媒の種類、流速の限界等により放熱量の増加に限界が存在する。したがって、これらの対処を施しても、ブラシレスDCモータの高出力化および／または高速回転化には限界が存在することになる。

本件発明者は超高速回転可能なブラシレスDCモータを得るべく鋭意研究を重ね、かつ実際に提供されている高速回転モータを分析した結果、第9図に実線で示すように、高速化に限界があることを見出し、ブラシレスDCモータの高出力化および／または高速回転化に限界が存在することを確認した。尚、図中黒点が従来実現されている高速モータ（または超高速モータ）の出力と回転数とを示している。そして、この限界は、回転速度の増加に伴なって渦電流の発生が顕著になり、渦電流損に起因する効率の低下および回転子の異常昇温が原因であることを見出した。

したがって、従来は、第9図に示す実線を越えるような超高速モータを実現することは不可能であった。

また、従来のブラシレスDCモータは上述のようにギャップ長を小さく設定しなければならないので、各構成部分の加工精度、組立て精度を著しく高めなければならず、ひいては製造作業が著しく繁雑化すると

もに、困難化するという不都合がある。

#### 発明の開示

5       この発明は上記の問題点に鑑みてなされたものであり、スロット開口幅を小さくし、冷却装置を装着するというような特別の作業が全く不要であり、しかも簡単に回転速度を高めることができる超高速ブラシレスDCモータを提供することを目的としている。

10       上記の目的を達成するための、請求項1の超高速ブラシレスDCモータは、固定子と回転子の金属的性質を有する部分との間のギャップ長を  $N^{5/6} \cdot p^{1/8} \cdot d \cdot K_g$  ( $d$ は固定子の内径、 $N$ は定格回転数(万r.p.m.)、 $P$ は定格出力(kW)、 $K_g$ はモータの固定子により定まる定数)以上に設定してある。

15       請求項2の超高速ブラシレスDCモータは、固定子と回転子の金属的性質を有する部分との間のギャップ長を  $(\gamma/0.3)^{1.95} \cdot N^{5/6} \cdot p^{1/8} \cdot d \cdot K_g$  ( $\gamma$ は固定子のスロットピッチに対するスロット開口長の比、 $d$ は固定子の内径、 $N$ は定格回転数(万r.p.m.)、 $P$ は定格出力(kW)、 $K_g$ はモータの形状および材質により定まる定数)以上に設定してある。

20       請求項3の超高速ブラシレスDCモータは、自然空冷用のフィンを有しているとともに、固定子と回転子の金属的性質を有する部分との間のギャップ長が、上記ギャップ長の  $1/K_s^{1/2}$  倍に設定されてある。

25       請求項4の超高速ブラシレスDCモータは、ギャップ長  $g$  を  $\pi D/(2p)$  ( $D$ は回転子の磁石表面を規定する直径、 $p$ はブラシレスDCモータの極数)未満に設定してある。

- 5 -

請求項5の超高速ブラシレスDCモータは、回転子として希土類永久磁石が装着されたものを用いている。

請求項6の超高速ブラシレスDCモータは、回転子に装着される永久磁石として、全ての領域について磁極軸に平行方向に磁化されたものを採用したものである。

請求項7の超高速ブラシレスDCモータは、回転子として、最外周に金属からなる保護管を装着してなるものを採用したものである。

請求項8の超高速ブラシレスDCモータは、回転子として、最外周に絶縁体からなる保護管を装着してなるものを採用したものである。

10 請求項9の超高速ブラシレスDCモータは、回転子として、最外周に金属または絶縁体からなり、かつ希土類永久磁石に対して回転子の軸中心に向かう方向の圧縮力を与える保護管を装着してなるものを採用したものである。

15 請求項10の超高速ブラシレスDCモータは、希土類永久磁石として、  
15 鑄造熱間加工希土類永久磁石を採用したものである。ここで、鑄造熱間加工希土類永久磁石としては、イットリウムを含む希土類元素のうち少なくとも1種、遷移金属元素のうち少なくとも1種およびIIIB族元素のうち少なくとも1種を原料基本成分として溶解・鑄造した後、500℃以上の温度で熱間加工することにより、磁性相を濃縮し、かつ機械的配向により磁氣的異方性を付与してなるものであることが好ましい。  
20 より好ましくは、Pr, Nd, Dy, Ce, La, Y, Thから選ばれた少なくとも1種以上の希土類元素、Fe, Co, Cu, Ag, Au, Ni, Zrのうちから選ばれた少なくとも1種以上の遷移金属元素、B, Ga, Alのうちから選ばれた少なくとも1種のIIIB族元素が例示  
25 でき、それぞれの原子百分比が12～25%、65～85%、3～10%であることが好ましい。

請求項1の超高速ブラシレスDCモータであれば、固定子と回転子の金属的性質を有する部分との間のギャップ長を $N^{5/6} \cdot p^{1/8} \cdot d \cdot Kg$ 以上に設定しているのであるから、従来のブラシレスDCモータのギャップ長と比較して著しく大きいギャップ長が設定される。この結果、固定子のスロットに起因する磁束密度変化がかなり大きくても、ギャップ長が大きいことに起因して、回転子においては磁束密度変化が大幅に低減された状態になり、回転子における渦電流の発生を著しく低減できる。したがって、運転効率を高くできるとともに、ギャップ長が大きいことに伴って回転子の発熱を大幅に抑制することができ、ひいては、安定した超高速回転を行なわせることができる。また、この超高速ブラシレスDCモータは、単にギャップ長を大きくしているだけであるから、固定子を設計し直す作業等が不要になる。また、ギャップ長が大きく設定されるのであるから、超高速ブラシレスDCモータの組み立ても容易になる。

請求項2の超高速ブラシレスDCモータであれば、固定子と回転子の金属的性質を有する部分との間のギャップ長を $(\gamma/0.3)^{1.95} \cdot N^{5/6} \cdot p^{1/8} \cdot d \cdot Kg$ 以上に設定しているのであるから、例えば、固定子巻線の線径に対してブラシレスDCモータが著しく大径であるような場合に、従来のブラシレスDCモータのギャップ長と比較して著しく大きいギャップ長が設定される。この結果、固定子のスロットに起因する磁束密度変化がかなり大きくても、ギャップ長が大きいことに起因して、回転子においては磁束密度変化が大幅に低減された状態になり、回転子における渦電流の発生を著しく低減できる。したがって、運転効率を高くできるとともに、ギャップ長が大きいことに伴って回転子の発熱を大幅に抑制することができ、ひいては、安定した超高速回



転を行なわせることができる。また、この超高速ブラシレスDCモータは、単にギャップ長を大きくしているだけであるから、固定子を設計し直す作業等が不要になる。また、ギャップ長が大きく設定されるのであるから、超高速ブラシレスDCモータの組み立ても容易になる。

- 5 請求項3の超高速ブラシレスDCモータであれば、自然空冷用のフィン
- 10 ンを有しているとともに、固定子と回転子の金属的性質を有する部分との間のギャップ長を、上記ギャップ長の  $1/K_s^{1/2}$  倍に設定している
- 15 のであるから、例えば、固定子巻線の線径に対してブラシレスDCモータが著しく大径であるような場合に、従来のブラシレスDCモータの
- 20 ギャップ長と比較して著しく大きいギャップ長が設定される。この結果、固定子のスロットに起因する磁束密度変化がかなり大きくても、ギャップ長が大きいことに起因して、回転子においては磁束密度変化が大幅に低減された状態になり、回転子における渦電流の発生を著しく低減できる。したがって、運転効率を一層高くできるとともに、ギャップ長が大きいことに伴って回転子の発熱を大幅に抑制することができ、ひいては、安定した超高速回転を行なわせることができる。また、この超高速ブラシレスDCモータは、単にギャップ長を大きくしているだけであるから、固定子を設計し直す作業等が不要になる。また、ギャップ長が大きく設定されるのであるから、超高速ブラシレスDCモータの組み立て

20 も容易になる。

請求項4の超高速ブラシレスDCモータであれば、ギャップ長  $g$  を  $\pi D / (2p)$  未満に設定しているのであるから、超高速回転を行なわせることができる。

- 25 請求項5の超高速ブラシレスDCモータであれば、回転子に装着される永久磁石が希土類永久磁石であるから、磁力が強く（BH積が大きく）、ギャップ長が大きいにも拘らず十分な磁束結合効率を達成できる。

請求項6の超高速ブラシレスDCモータであれば、回転子に装着される永久磁石として、全ての領域について磁極軸に平行方向に磁化されたものを採用しているので、固定子と回転子との間隙における磁束密度を正弦波状に変化させることができ、高調波成分が殆どない状態にできるので、固定子における高調波に起因する鉄損を殆ど皆無にでき、運転効率を一層高めることができる。

請求項7の超高速ブラシレスDCモータであれば、回転子として、最外周に金属からなる保護管を装着してなるものを採用しているので、従来のブラシレスDCモータと比較して保護管の厚みを著しく大きくでき、  
10 超高速回転を行なわせた場合にも永久磁石を確実に保護できる。この結果、安定した超高速回転を達成できる。

請求項8の超高速ブラシレスDCモータであれば、回転子として、最外周に絶縁体からなる保護管を装着してなるものを採用しているので、保護管における渦電流が全く発生しない。したがって、保護管部分における渦電流が皆無になることに伴って運転効率を一層高めることができる。

請求項9の超高速ブラシレスDCモータであれば、回転子として、最外周に金属または絶縁体からなり、かつ永久磁石に対して回転子の軸中心に向かう方向の圧縮力を与える保護管を装着してなるものを採用して  
20 いるので、請求項7または請求項8の場合よりも高い永久磁石保護効果を達成でき、より高い超高速運転を達成できる。もちろん、請求項7または請求項8の場合と同様に保護管の厚みを著しく大きくできるので、永久磁石に対する高い圧縮効果を達成できる。

請求項10の超高速ブラシレスDCモータであれば、希土類永久磁石  
25 として、鑄造熱間加工希土類永久磁石を採用しているので、永久磁石自体の強度を焼結型の希土類永久磁石よりも著しく大きくでき、保護管を

省略することが可能になる。もちろん保護管を設けることもできるが、この場合には上限回転速度を著しく高めることができる。また、鑄造熱間加工希土類永久磁石は金属に類似する性質を有しており、高精度の加工が可能であるとともに、密度が均一であるから、永久磁石が装着された回転子のバランスをとりやすく、しかも、保護管を用いる場合には永久磁石における応力を簡単に低減でき、この結果、超高速ブラシレスDCモータの各部の精度を高くでき、全体として良好なバランスを保持させることができ、しかも製造、組立てを簡単化できる。特に、金属からなる保護管を装着してなる回転子を採用する場合と比較すれば、希土類永久磁石が最も外周に位置することになるので、磁束結合効率を一層高めることができる。

さらに詳細に説明する。

本件発明者は、従来のブラシレスDCモータの限界を越える出力および回転数の超高速ブラシレスDCモータを得るために鋭意研究を重ねた結果、磁束結合効率を高めるために固定子と回転子との間のギャップ長を可能な限り小さくすることがかえって超高速回転を阻害することを見出した。即ち、超高速回転時には、固定子にスロットに起因する磁束密度の周波数が高くなり、この磁束密度に起因して回転子に著しく渦電流が流れてしまい、運転効率が大幅に低下してしまう。また、渦電流損が大きくなることに起因して回転子の発熱が大きくなり、しかもギャップ長が短いことに起因して放熱効率を良好にできないので、回転子の温度が徐々に上昇してしまい、永久磁石の磁力喪失、回転子自体の溶解等をひきおこしてしまう。

これらの知見に基づいて超高速ブラシレスDCモータのギャップ長をどの程度大きくすればよいかについて鋭意研究を重ねた結果、定格回転数および定格出力に基づいて定まるギャップ長、例えば、 $N^{5/6}$ 。

$P^{1/8} \cdot d \cdot K_g$  以上になるように、固定子と回転子とのギャップ長を設定すれば、渦電流の大幅な低減を達成できるとともに、低減された渦電流に起因する発熱が存在していても発熱を上回る放熱効率を達成できることを見出し、本件発明を完成したのである。

- 5 上記ギャップ長を規定する式  $N^{5/6} \cdot P^{1/8} \cdot d \cdot K_g$  についてさらに詳細に説明する。

固定子のスロットによるギャップ中の空間高調波の振幅は、スロットがない場合のギャップ磁束密度の平均値とスロットがある場合のギャップの磁束密度の平均値との差で表せる。

- 10 先ず、スロットがない場合のギャップ磁束密度の平均値  $B_g$  は、

$$B_g = B_r \cdot C_\phi / (1 + P_m / P_o)$$

で表せる。但し、 $P_m$  は磁石のパーミアンス、 $P_o$  はギャップのパーミアンス、 $C_\phi$  は磁石-ギャップ表面積比、 $B_r$  は磁石の残留磁束密度である。

- 15 また、スロットがある場合のギャップ磁束密度の平均値  $B_{gs}$  は、

$$B_{gs} = B_r \cdot C_\phi / (1 + P_m / P_s)$$

で表せる。但し、 $P_s$  はスロットがある場合のパーミアンスであり、このパーミアンス  $P_s$  は、

$$P_s = \mu_0 \{ w/g - (4/\pi) \log(1 + \pi s/4g) \}$$

- 20 で表せる。但し、 $w$  は固定子の歯の幅、 $g$  は固定子と回転子との間のギャップ長である。このパーミアンス  $P_s$  を表す式にカーター係数の近似式を導入すれば、

$$P_s = \mu_0 \cdot A_g / k \cdot g$$

$$k = t / [t - \{ (s/g)^2 / (5 + s/g) \} \cdot g]$$

- 25 で表せる。但し、 $A_g$  はギャップ表面積、 $t$  はスロットピッチ、 $s$  はスロット開口長である。

したがって、空間高調波の振幅  $B_m$  は、 $B_m = |B_g - B_{gs}|$  となり（第3図（A）参照）、 $B_m$  を  $g/d$ （但し、 $d$  は固定子の内径）で無次元化すると第3図（B）に示すとおりになる。

また、 $B_m$  を  $g/d$  の関数で表現すると、

$$5 \quad B_m = \alpha / (g/d)$$

となる。但し、 $\alpha$  はスロット開口長により定まる定数である。したがって、 $\alpha$  と  $s/t$  との関係は第3図（C）に示すとおりになり、 $\alpha = \beta (s/t)^{1.95}$ （但し、 $\beta = 0.0069 \sim 0.0071$ ）で近似できる。この結果、上記振幅  $B_m$  は、 $B_m = \beta (s/t)^{1.95} /$

$$10 \quad (g/d)$$

となる。

次に、金属管損失  $W_1$  は、

$$W_1 \propto B_m^2$$

で表せるため、 $g/d$  においては、

$$15 \quad W_1 \propto 1 / (g/d)^2$$

となり、固定子の内径に対するギャップ長の比率の2乗に反比例することが分る。

しかし、実際のブラシレスDCモータでは、回転数の変化、出力の変化に伴うモータ形状の変化に起因して損失の発生度合も変化するのであるから、これらの変化をも考慮しなければならない。この点について

20 以下に詳述する。

モータの出力を  $P$  (kw)、回転速度を  $N$  (万 r. p. m.)、回転子の直径を  $D$  (m)、回転子の軸方向の長さを  $L$  (m)、出力係数を  $K$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  とすれば、モータの出力方程式は次式で与えられる。

$$25 \quad P = K \cdot D^2 \cdot L \cdot N$$

$$P = K_1 \cdot D^3 \cdot L \cdot N$$

$$P = K^2 \cdot D^{8/3} \cdot L^{4/3} \cdot N$$

ここで、D、Lが同一比率 $\alpha$ で変化するものと仮定すれば、上の3つの式は次のように簡素化できる。

$$P = \alpha^3 \cdot N$$

$$5 \quad P = \alpha^4 \cdot N$$

したがって、同一出力のモータにおいて回転速度を $kN$ 倍にした場合には、各部の寸法が

$$\alpha = kN^{-1/3} \sim kN^{-1/4} \text{ 倍}$$

の範囲に、一般的に変化することが分る。

10 また、同一回転速度のモータにおいて出力を $kP$ 倍にした場合には、同様に、

$$\alpha = kP^{1/3} \sim kP^{1/4} \text{ 倍}$$

になることが分る。

<回転速度が $kN$ 倍になった場合のギャップ>

15 上述のように、同一出力のモータにおいて回転速度が $kN$ 倍になると、

$$\alpha = kN^{-1/3} \sim kN^{-1/4} \text{ 倍}$$

になる。このとき、渦電流に起因する回転子発熱部の体積はモータ体積と同様に $\alpha^3$ になるが、渦電流の周波数が $kN$ 倍になるので、単位体積当りの渦電流損は $kN^2$ 倍になる。したがって、回転子の発熱量の増加

$$20 \quad \begin{aligned} &\text{は、} \\ &\alpha^3 \cdot kN^2 = kN^{-1} \cdot kN^2 \sim kN^{-3/4} \cdot kN^2 \\ &= kN \sim kN^{5/4} \text{ 倍} \end{aligned}$$

となる。

25 他方、回転子の放熱面積は $\alpha^2$ 倍になるので、回転子の温度上昇を防止するためには、

$$\text{発熱量/放熱面積} = k_t \cdot kN \cdot kN^{2/3} \sim k_t \cdot kN^{5/4} \cdot kN$$

- 13 -

$$2/4$$

$$= k_t \cdot k_N^{5/3} \sim k_t \cdot k_N^{7/4} = \text{一定}$$

となるように、渦電流に起因する発熱量を低減すべくギャップを広げる必要があることを本件発明者は見出した。

- 5 尚、一般的に温度上昇が問題になる場合には寸法を大きくするのであり、このことを考慮して、ギャップにより損失を低減する割合として  $k_N^{5/3}$  を採用する。また、ギャップ長  $g$  と損失  $W_1$  との関係は、  
 $g/d \propto W_1^{-1/2}$

で表されるので、回転速度を  $k_N$  倍にしたときの損失  $W_1'$  を、

$$10 \quad W_1' = W_1 / k_N^{5/3}$$

とする必要がある。したがって、ギャップ長  $g$  を、

$$g/d = (1/k_N^{5/3})^{-1/2} = k_N^{5/6}$$

の割合で増加する必要がある。

<出力が  $k_P$  倍になった場合のギャップ>

- 15 上述の式から明らかなように、同一回転速度のモータにおいて出力が  $k_P$  倍になると、

$$\alpha = k_P^{1/3} \sim k_P^{1/4} \text{ 倍}$$

になる。このとき、渦電流に起因する回転子発熱部の体積はモータ体積

と同様に  $\alpha^3$  になる。したがって、回転子の発熱量の増加は、

$$20 \quad \alpha^3 = k_P \sim k_P^{3/4} \text{ 倍}$$

となる。

他方、回転子の放熱面積は  $\alpha^2$  倍になるので、回転子の温度上昇を防止するためには、

$$\text{発熱量/放熱面積} = k_t \cdot k_P \cdot k_P^{-2/3} \sim k_t \cdot k_P^{3/4} \cdot k$$

$$25 \quad P^{-2/4} = k_t \cdot k_P^{1/3} \sim k_t \cdot k_P^{1/4} = \text{一定}$$

となるように、渦電流に起因する発熱量を低減すべくギャップを広げる

必要があることを本件発明者は見出した。

尚、回転速度が  $kN$  倍になった場合と同様に、ギャップにより損失を低減する割合として  $kP^{1/4}$  を採用する。また、ギャップ長  $g$  と損失  $W_1$  との関係は、

$$5 \quad g/d \propto W_1^{-1/2}$$

で表されるので、出力を  $kP$  倍にしたときの損失  $W_1'$  を

$$W_1' = W_1 / kP^{1/4}$$

とする必要がある。したがって、ギャップ長  $g$  を、

$$g/d \propto (1/kP^{1/4})^{-1/2} = kP^{1/8}$$

10 の割合で増加する必要がある。

以上の回転速度を  $kN$  倍にした場合の結果と、出力を  $kP$  倍にした場合の結果とを総合すれば、ギャップ長  $g$  と固定子内径  $d$  との関係式が次のとおり得られる。

$$g/d \geq K_g \cdot kN^{5/6} \cdot kP^{1/8}$$

15 但し、 $K_g$  はモータの形状および材質に基づいて定まる定数である。

ここで、対象となるモータの回転速度を  $N$ 、出力を  $P$  とし、基準になる回転速度を  $N_0$ 、出力を  $P_0$  とすれば、

$$\begin{aligned} g/d &\geq K_g \cdot (N/N_0)^{5/6} \cdot (P/P_0)^{1/8} \\ &= K_g \cdot N_0^{-5/6} \cdot P_0^{-1/8} \cdot N^{5/6} \cdot P^{1/8} \end{aligned}$$

20 となる。そして、基準になる回転速度、出力を共に 1 にすれば、

$N_0^{-5/6} \cdot P_0^{-1/8}$  は 1 になるので、上記式は、

$$g/d \geq K_g \cdot N^{5/6} \cdot P^{1/8} \text{ と表せる。}$$

以上には、固定子巻線の線径に対してブラシレス DC モータのサイズが通常の割合である場合について説明した。しかし、固定子巻線の線径

25 に対してブラシレス DC モータのサイズが著しく大きいような場合には、上記振幅  $B_m$  を表す式



- 15 -

$$B_m = \beta (s/t)^{1.95} / (g/d)$$

に含まれる  $(s/t)$  を無視し得なくなるので、金属管損失  $W_1$  は、

$$W_1 \propto (\gamma/0.3)^{1.95} / (g/d)$$

となる。但し、 $\gamma = s/t$ 、0.3 は一般的な  $s/t$  の値である。

- 5       そして、金属管損失  $W_1$  を示す上式および上記知見に基づいて、上記と同様の式の変形を行ない、かつ基準になる回転速度  $N$ 、出力  $P$  を共に 1 にすることにより、
- $$g/d \geq K g \cdot (\gamma/0.3)^{1.95} \cdot N^{5/6} \cdot P^{1/8}$$
- 10       の関係を得ることができる。

#### 図面の簡単な説明

第1図はこの発明の超高速ブラシレスDCモータの一実施例を示す要部概略図である。

- 15       第2図は固定子と回転子との間における磁束密度を示す図である。

第3図は空間高調波の振幅が距離の増加に伴って急激に減少することを示す図である。

第4図は空間高調波の振幅が、スロットピッチに対するスロット開口長の増加に伴って増加することを示す図である。

- 20       第5図はこの発明の超高速ブラシレスDCモータの他の実施例を示す要部概略図である。

第6図はこの発明の超高速ブラシレスDCモータの回転子に装着される希土類永久磁石の磁化方向を示す概略図である。

第7図は磁束密度の変化を示す図である。

- 25       第8図はこの発明の超高速ブラシレスDCモータのさらに他の実施例を示す要部概略図である。

第9図は従来のブラシレスDCモータの高速化の限界を示す図である。

発明を実施するための最良の形態

5 以下、実施例を示す添付図面によって詳細に説明する。

10 第1図はこの発明の超高速ブラシレスDCモータの一実施例を示す要部概略図であり、固定子1と回転子2との間のギャップ長 $g$ が $N^{5/6} \cdot P^{1/8} \cdot d \cdot K_g$ 以上に設定されてある。但し、 $d$ は固定子の内径、 $N$ は定格回転数(万r.p.m.)、 $P$ は定格出力(kW)、 $K_g$ はモータの固定子により定まる定数である。尚、1aはスロット、1bは歯部、1cは固定子巻線、2aは軸、2bは希土類永久磁石、2cは金属からなる保護管である。もちろん、上記希土類永久磁石2bは互に微小間隙を介在させた状態で少なくとも1対設けられている。但し、微小間隙を設けることなく、全体が一体化された円筒状の希土類永久磁石を用いることも可能である。

15 上記定数 $K_g$ は、例えば、固定子1の内径が $\phi 31$ 、スロットピッチが5.4mm、スロットの開口幅が1.8mmであり、保護管2cとしてステンレス製の管を用いた場合には $1/200$ になる。また、ステンレス製の管に代えて、金属的性質を有する部分の最外周部として固有抵抗が $72 \times 10^{-8} \sim 144 \times 10^{-8} \Omega m$ のものを採用した場合にも定数 $K_g$ が $1/200$ になる。もちろん、保護管2cを省略した場合であっても、希土類永久磁石2bの固有抵抗が上述の値であれば、定数 $K_g$ が $1/200$ になる。そして、定格回転数を17万r.p.m.、定格出力を5kWに設定する場合には、上記式に基づいてギャップ長 $g$ が $\frac{2.01}{L_g}$ mm以上に設定される。実際にギャップ長を2.01mm以上に設定したブラシレスDCモータを運転したところ、上記回転数、出力で安定し

20

25

て回転し続けた。上記構成の固定子を用いた従来のブラシレスDCモータの場合には、ギャップ長が0.16~0.31mmに設定されていたのと比較して、この実施例のギャップ長は、1桁大きくなっていることが分る。

- 5 第2図は固定子1と回転子2との間における磁束密度を示す図であり、従来のブラシレスDCモータの回転子の表面（図中破線参照）における磁束密度は、歯部1bに正対する位置において最も大きく、スロット1aと正対する位置において最も小さいとともに、両磁束密度の差が著しく大きい。これに対して、この実施例の超高速ブラシレスDCモータの
- 10 回転子の表面（図中実線参照）における磁束密度は、歯部1bに正対する位置において最も大きく、スロット1aと正対する位置において最も小さいとともに、両磁束密度の差が著しく小さい。尚、上記両磁束密度の差は磁束の空間高調波の振幅であり、空間高調波の振幅が距離の増加に伴って急激に減少することを示す第3図のグラフとも一致する。そ
- 15 して、回転子2の表面における磁束密度の変化が大きいほど渦電流が顕著に発生するのであるから、この実施例の回転子2の表面において発生する渦電流は従来のブラシレスDCモータと比較して著しく低減されており、ひいては渦電流損に起因する発熱も大幅に低減されている。したがって、定格回転数を著しく大きく設定した超高速ブラシレスDCモータ
- 20 であっても、回転数の増加に伴って増加する渦電流の増加の程度を大幅に抑制できる。

- また、渦電流の発生が大幅に抑制されても、抑制された渦電流に起因して回転子2に発熱が生じ、しかもこの発熱は渦電流の周波数が高くなることに起因して、到底無視し得ない量になる。しかし、この実施例に
- 25 においては、渦電流の発生を大幅に抑制でき、かつ渦電流に起因する発熱を十分に放熱し得るようにギャップ長gを設定している。

具体的には、 $N^{5/6}$  が回転数の増加に伴う渦電流損を十分に低減するための係数であり、 $P^{1/8}$  が大容量化に伴う放熱の困難さを回避するための係数である。

5        また、上述のようにギャップ長を大きくすると、固定子1と回転子2との間の磁束結合効率が著しく低下し、かえって運転効率を低下させることになると思われるが、この実施例においては、回転子2に磁力（BH積）が大きい希土類永久磁石2bを採用しているのであるから、十分な磁束結合効率を達成できる。

10        したがって、従来は実現不可能であると思われていた超高速ブラシレスDCモータを実現できる。また、従来実現されているのと同じ回転速度のブラシレスDCモータを得る場合には、ギャップ長を著しく大きくできる関係上、構成各部の寸法精度、組立て精度を余り高めなくてもよくなり、ひいてはブラシレスDCモータの低価格化を達成できる。

15        尚、この実施例において、内向きの圧縮力を希土類永久磁石2bに作用させることができる保護管2cを採用することが可能であり、この場合には、回転子2の回転に起因する遠心応力がかなり大きくなる超高速回転速度まで希土類永久磁石2bを確実に保護でき、しかも保護管2cの厚みを大きくでき、ひいては内向きの圧縮力を大きくできるのであるから、ブラシレスDCモータの高速化に好適である。

20        以上には、固定子のスロットピッチに対するスロット開口長の比 $\gamma$ （ $= (s/t)$ ）がほぼ0.3であるブラシレスDCモータについて説明した。しかし、 $\gamma$ が0.3からかなりかけ離れた値である場合には、第4図に示すように、空間高調波の振幅 $B_m$ が $g/d$ のみならず $\gamma$ にも依存して変化することになる。尚、第4図中、白丸が $g/d = 0.01$ の場合を、黒丸が $g/d = 0.02$ の場合を、白四角が $g/d = 0.05$ の場合を、黒四角が $g/d = 0.1$ の場合をそれぞれ示している。

25

したがって、定格回転数および定格出力が設定されれば、これらに基づいて定まる、空間高調波の最大振幅を得、空間高調波の振幅が最大振幅よりも小さくなる範囲（第4図中に示す破線よりも下の範囲）に位置する $\gamma$ と $g/d$ との組合せを達成できるようにブラシレスDCモータを製造すればよい。即ち、 $\gamma$ を小さくするか、または $g/d$ を大きくすることにより対処することができる。

但し、 $\gamma$ を小さくする場合には、 $\gamma$ の値に合わせて固定子を製造し、しかも全てのスロットに固定子巻線をセットする必要があるのに対して、 $g/d$ を大きくする場合には、巻線が不要な回転子を $g/d$ の値に合わせて製造するだけでよいから、 $\gamma$ の値を変化させることなく $g/d$ のみを変化させること（即ち、回転子のみを交換すること）が好ましい。

## 実施例2

第5図はこの発明の超高速ブラシレスDCモータの他の実施例の要部概略図であり、第1図の実施例と異なる点は、金属製の保護管2cに代えて絶縁体からなる保護管2dを採用した点のみである。

この実施例においては、第1図の実施例と異なり保護管2dには渦電流が発生しないが、保護管2dの内部に位置する金属的性質を有する部分（回転子鉄心、希土類永久磁石）に渦電流が発生することになるので、固定子1の歯部1bと上記金属的性質を有する部分の表面との間の距離をギャップ長とすることになる。

したがって、従来のブラシレスDCモータよりも十分に大きいギャップ長の範囲内において、カーボンファイバ、セラミック、ガラス繊維等の絶縁体からなる保護管2dを装着すればよいことになり、保護管2dの厚みを大きくして十分な永久磁石保護効果を達成できる。

これに対して、従来のブラシレスDCモータでは、上述のように、ギャップ長が固定子の内径の $1/100 \sim 1/200$ 程度であり、このギャップ長の範囲内において十分な永久磁石保護効果を達成できる絶縁体製の保護管を設けることは到底不可能であった。

- 5     尚、この実施例において、内向きの圧縮力を希土類永久磁石2bに作用させることができる保護管2cを採用することが可能であり、この場合には、回転子2の回転に起因する遠心応力がかなり大きくなる超高速回転速度まで希土類永久磁石2bを確実に保護でき、しかも保護管2cの厚みを大きくでき、ひいては内向きの圧縮力を大きくできるのである
- 10    から、ブラシレスDCモータの高速化に好適である。

### 実施例3

- 第6図はこの発明の超高速ブラシレスDCモータの回転子に装着され
- 15    る希土類永久磁石の磁化方向を示す概略図であり、希土類永久磁石2bの全範囲にわたって互に平行な磁束を発生するように磁化されている。

- したがって、この実施例の場合には、希土類永久磁石2bが固定子1の歯部1bと正対する状態において、希土類永久磁石に起因する磁束密度が最も大きくなり、固定子1のスロット1aと正対する状態において
- 20    磁束密度が最も小さくなる。そして、何れとも正対しない状態においては、磁極軸と平行方向に磁化された希土類永久磁石の磁束が固定子1の歯部1bと結合する磁束量がずれ角度に応じて徐々に変化するのであるから、ずれ角度に対応してなだらかに磁束密度が変化する。この結果、磁束密度は正弦波状に変化し、高調波成分を殆ど含まないことになる
- 25    (第7図参照)。磁束密度が正弦波状に変化すれば、固定子における鉄損の発生を大幅に抑制でき、実施例1または実施例2における高効率化

と相俟って著しい高効率化を達成できる。したがって、超高速ブラシレスDCモータを簡単に実現できることになる。

- 5 第7図中に破線で示す矩形波は、回転子2の永久磁石を、全範囲にわたって放射状に磁束を発生するように磁化された永久磁石を採用した場合における磁束密度変化を示す図であり、矩形波状になるのであるから種々の高調波成分を含んでおり、高調波成分に起因して固定子1における鉄損が増加し、鉄損の増加に伴って運転効率が低下してしまう。

- 10 第7図中に一点鎖線で示す波形は、永久磁石をこの実施例と同様に磁化し、しかも従来のブラシレスDCモータと同様のギャップ長を採用した場合における磁束密度変化を示す図であり、正弦波よりも矩形波に近い波形であるから、矩形波の場合に近い鉄損の発生がある。

- 15 以上の比較例との比較から明らかなように、ギャップ長を長くし、しかも平行方向に磁化された希土類永久磁石2bを採用することにより、固定子1における鉄損をも大幅に低減でき、ひいては著しく高効率の超高速ブラシレスDCモータを実現することができる。

#### 実施例4

- 20 第8図はこの発明の超高速ブラシレスDCモータのさらに他の実施例を示す要部概略図であり、上記実施例と異なる点は、希土類永久磁石2bとして、鑄造熱間加工希土類永久磁石を採用し、保護管2c, 2dを省略した点のみである。

- 25 上記鑄造熱間加工希土類永久磁石は、磁力が強いだけでなく、機械的強度も強いのであるから、保護管を用いなくても、超高速回転時における永久磁石の破損を未然に防止できる。この結果、回転子2の構成および製造作業を簡素化できる。

5 5 鑄造熱間加工希土類永久磁石の一例として、 $\text{Pr}17 \cdot \text{Fe}76 \cdot 5$   
・ $\text{B}5 \cdot \text{Cu}1 \cdot 5$ を基本組成とし、溶解・鑄造、熱間加工熱処理を行  
なった後に着磁を行なったものを採用した場合には、BH積の代表値が  
27 MGOe、曲げ強さが $36 \text{ kgf/mm}^2$ 以上、引張強さが $24 \text{ kg}$   
f /  $\text{mm}^2$ 以上、圧縮強度が $95 \text{ kgf/mm}^2$ であり、10万回転を越え  
る超高速ブラシレスDCモータに適用する場合であっても、保護管を用  
いることなく回転子2を構成できることが分る。

## 10 実施例5

15 この発明のブラシレスDCモータにおいてギャップ長 $g$ の最大値を考  
える場合、磁石からの磁束が固定子に流れなければモータとしてトルク  
を発生されることができない。要するに、磁石から固定子までの距離 $g$   
が磁極間（磁石のN極とS極との距離）よりも小さければ、少なからず  
固定子に磁束が流れ、モータとしてトルクを発生させることができる。

したがって、次式で示す関係が成立する。

$$g_{\text{max}} < \pi D / (2p)$$

20 但し、 $g_{\text{max}}$ はギャップ長 $g$ の上限値、 $D$ は回転子の磁石表面を規定  
する直径、 $p$ はブラシレスDCモータの極数である。

即ち、ブラシレスDCモータとして動作させ得る限界値がギャップ長  
 $g$ の上限値になる。

25 そして、ブラシレスDCモータの定格回転数を17万 r. p. m.、  
定格出力を5 kWに設定する場合には、上記式に基づいてギャップ長 $g$   
が15.7 mm未満に設定される。実際にギャップ長を15.7 mm未満に  
設定したブラシレスDCモータを運転したところ、上記回転数、出力で  
安定して回転し続けた。



## 実施例 6

この実施例の超高速ブラシレスDCモータは、自然空冷用のフィン  
 5 設け、かつギャップ長  $g$  を  $N^{5/6} \cdot P^{1/8} \cdot d \cdot K_g / K_s^{1/2}$  以上に設定している。但し、 $K_s$  は自然空冷用のフィン設けることによる表面積の増加により定まる定数、 $d$  は固定子の内径、 $N$  は定格回転数（万 r. p. m.）、 $P$  は定格出力（kW）、 $K_g$  はモータの固定子により定まる定数である。さらに詳細に説明する。

10 さらに、上述のギャップ長  $g$  の下限値の算出において、面積当りの放熱量が一定であると仮定しているが、実際には、ブラシレスDCモータにごく簡易な構成の自然空冷用のフィン  $2d$  を設けた場合には、表面積が増加し、放熱量が増加する。したがって、この場合には、発熱量/放熱面積の関係として  $(\alpha^3 \cdot k N^2) / \alpha^2$  に代えて  $(\alpha^3 \cdot k N^2)$   
 15  $/(K_s \cdot \alpha^2)$  を採用すればよい。但し、 $K_s$  は1以上の値である。

この場合には、冷却効果時のギャップ長を  $g$ 、常温時冷却効果なしの場合のギャップ長を  $g'$  とすれば、 $g = g' / K_s^{1/2}$  となる。具体的には、自然空冷用のフィン設けることにより表面積が2倍になった場合には、自然空冷時の放熱効果  $K_s$  がほぼ2になるので、常温時冷却  
 20 効果なしの場合のギャップ長  $g'$  の0.707倍以上になるようにギャップ長を設定すればよいことになる。

尚、この発明は上記の実施例に限定されるものではなく、例えば、以上の各実施例において、回転子2の金属的性質を有する部分の最外周として固有抵抗が  $144 \times 10^{-8} \Omega m$  以下のもの（ $3 \times 10^{-8} \sim 14$   
 25  $4 \times 10^{-8} \Omega m$  のものでもよい）を採用することが可能であり、この場合にも定数  $K_g$  が  $1/200$  になる。その他、この発明の要旨を変更

しない範囲内において種々の設計変更を施すことが可能である。

#### 産業上の利用可能性

- 5      この発明は、固定子と回転子の金属的性質を有する部分との間のギャップ長を大きくすることにより、超高速回転可能なブラシレスDCモータを得ることができ、超高速回転が要求される各種装置の駆動源として有用である。

10

15

20

25

## 請求の範囲

5 1. 固定子(1)と回転子(2)の金属的性質を有する部分との間のギャップ長 $g$ を $N^{5/6} \cdot P^{1/8} \cdot d \cdot K_g$  ( $d$ は固定子の内径、 $N$ は定格回転数(万r.p.m.)、 $P$ は定格出力(kW)、 $K_g$ はモータの形状および材質により定まる定数)以上に設定してあることを特徴とする超高速ブラシレスDCモータ。

10 2. 固定子(1)と回転子(2)の金属的性質を有する部分との間のギャップ長 $g$ を $(\gamma/0.3) \cdot 1.95 \cdot N^{5/6} \cdot P^{1/8} \cdot d \cdot K_g$  ( $\gamma$ は固定子のスロットピッチに対するスロット開口長の比、 $d$ は固定子の内径、 $N$ は定格回転数(万r.p.m.)、 $P$ は定格出力(kW)、 $K_g$ はモータの形状および材質により定まる定数)以上に設定してあることを特徴とする超高速ブラシレスDCモータ。

15 3. 自然空冷用のフィンを有しているとともに、固定子と回転子の金属的性質を有する部分との間のギャップ長 $g$ が、上記ギャップ長 $g$ の $1/K_s^{1/2}$ 倍( $K_s$ は自然空冷用のフィン設けることによる表面積の増加により定まる定数)に設定されてある請求項1または請求項2に記載の超高速ブラシレスDCモータ。

20 4. ギャップ長 $g$ を $\pi D / (2p)$  ( $D$ は回転子の磁石表面を規定する直径、 $p$ はブラシレスDCモータの極数)未満に設定してある請求項1から請求項3の何れかに記載の超高速ブラシレスDCモータ。

5. 回転子(2)として希土類永久磁石(2b)が装着されたものを用いている請求項1から請求項4の何れかに記載の超高速ブラシレスDCモータ。

25 6. 回転子(2)に装着される永久磁石(2b)として、全ての領域について磁極軸に平行方向に磁化されたものを採用している請求項1

から請求項5の何れかに記載の超高速ブラシレスDCモータ。

7. 回転子(2)として、最外周に金属からなる保護管(2c)を装着してなるものを採用している請求項1から請求項6の何れかに記載の超高速ブラシレスDCモータ。

5 8. 回転子(2)として、最外周に絶縁体からなる保護管(2d)を装着してなるものを採用している請求項1から請求項6の何れかに記載の超高速ブラシレスDCモータ。

9. 回転子(2)として、最外周に金属または絶縁体からなり、かつ希土類永久磁石(2b)に対して回転子の軸中心に向かう方向の圧縮力を与える保護管(2c)(2d)を装着してなるものを採用している  
10 請求項1から請求項6の何れかに記載の超高速ブラシレスDCモータ。

10. 希土類永久磁石(2b)として、鑄造熱間加工希土類永久磁石を採用している請求項5から請求項9の何れかに記載の超高速ブラシ  
レスDCモータ。

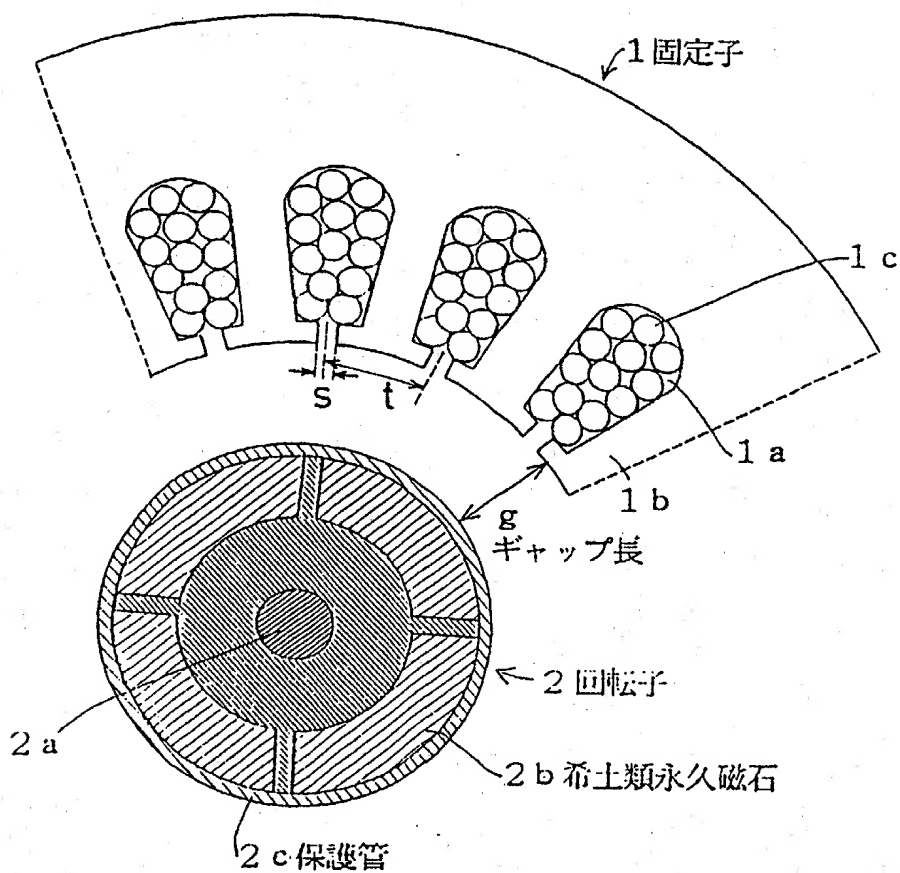
15

20

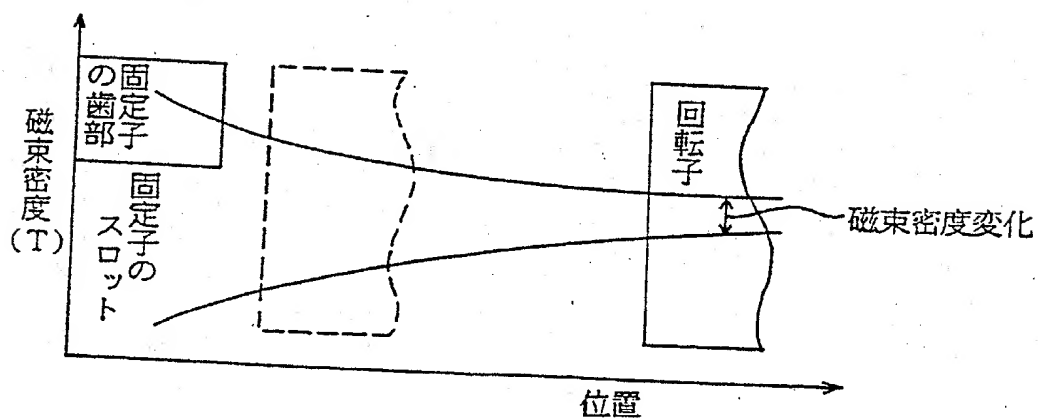
25

1/6

第 1 図



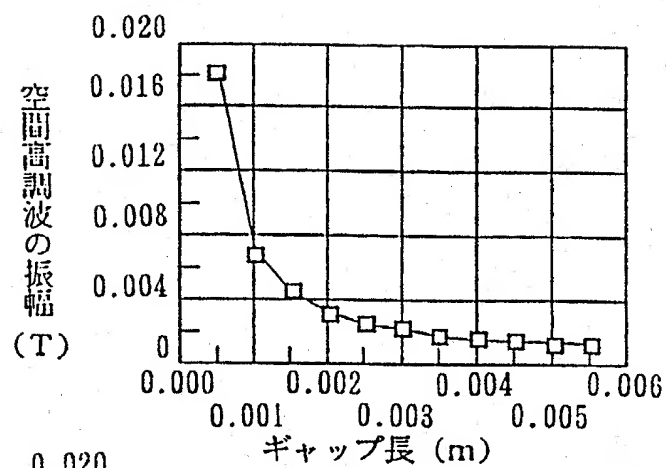
第 2 図



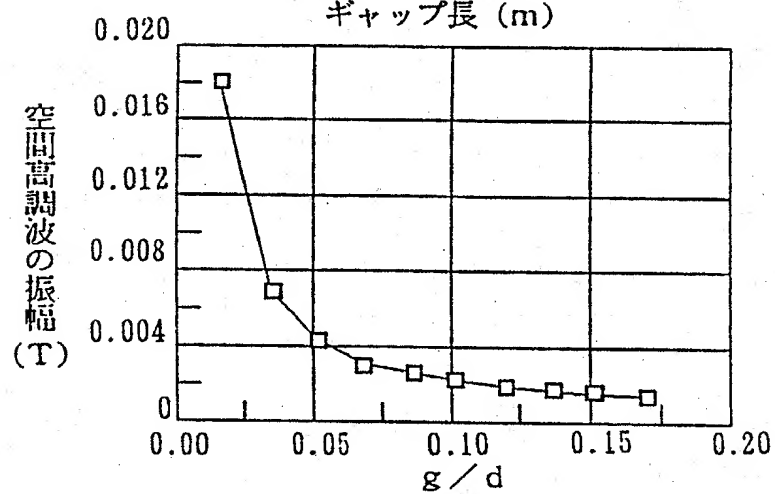
2/6

## 第3図

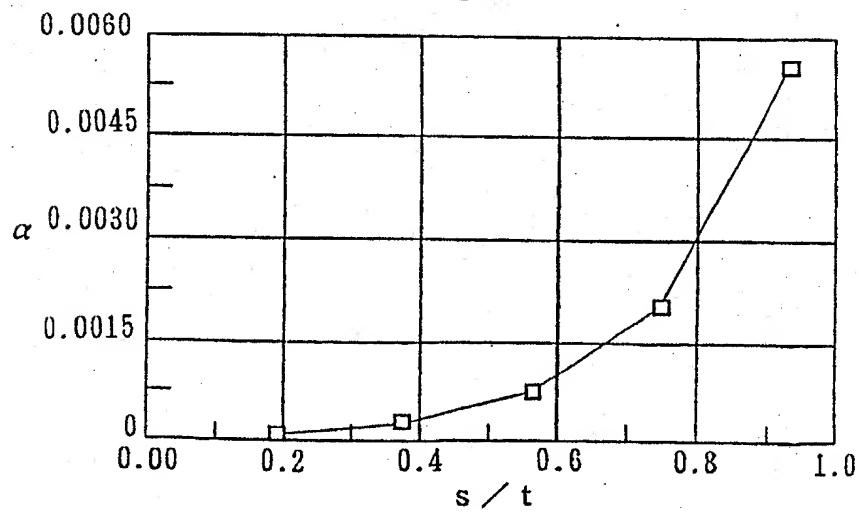
(A)



(B)

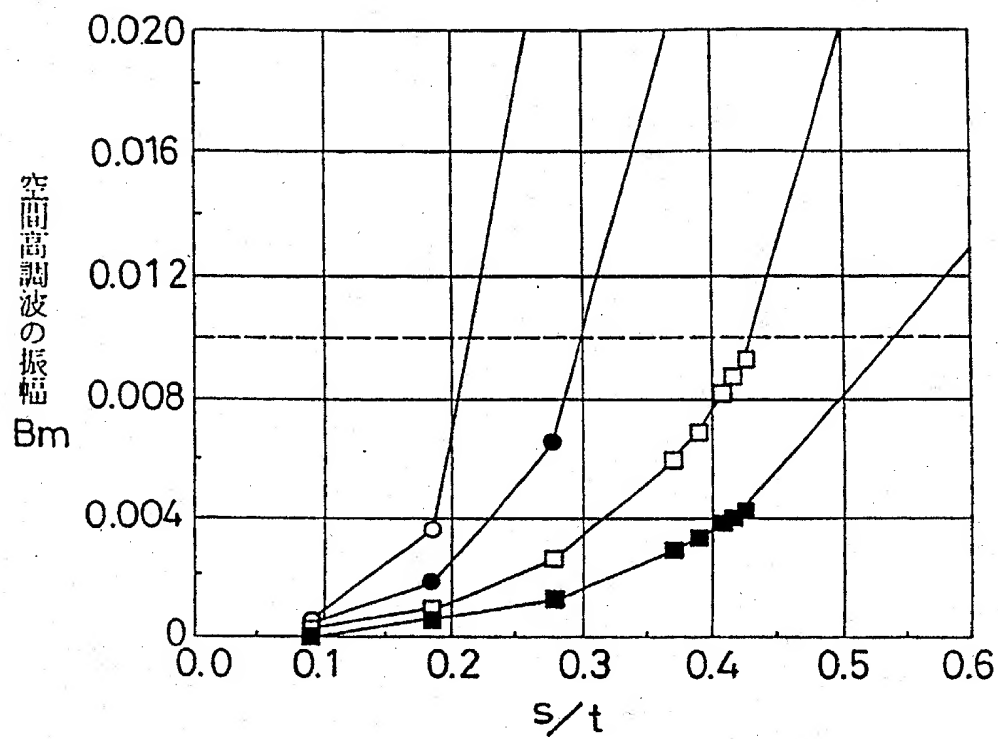


(C)



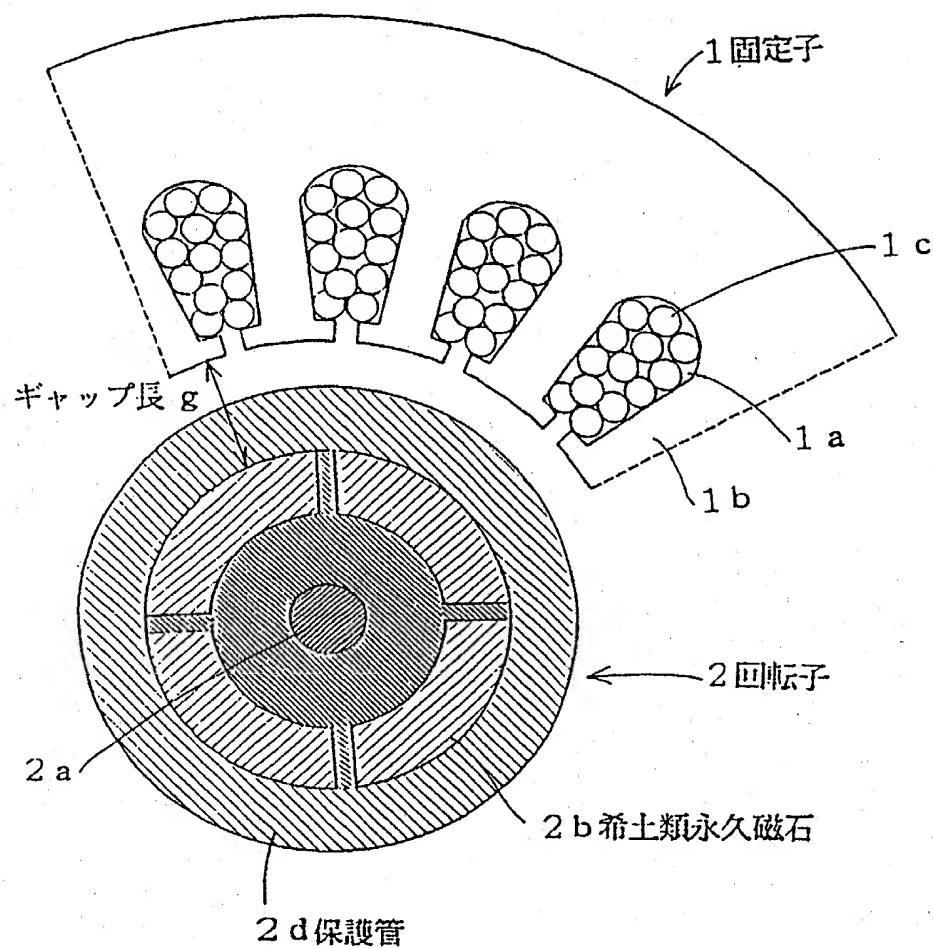
3/6

第4図

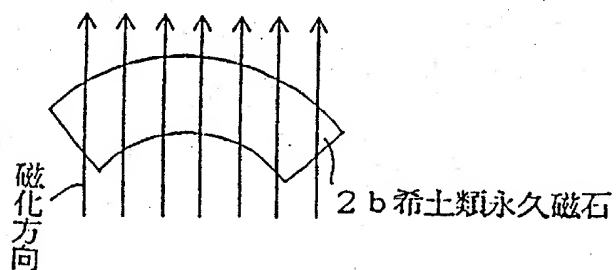


4/6

第5図



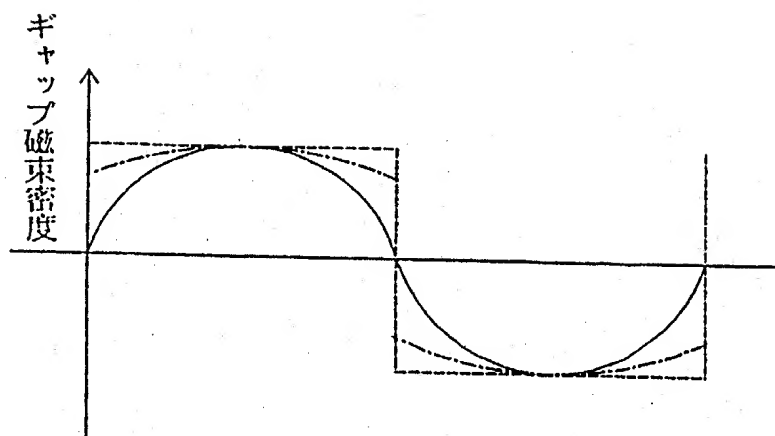
第6図



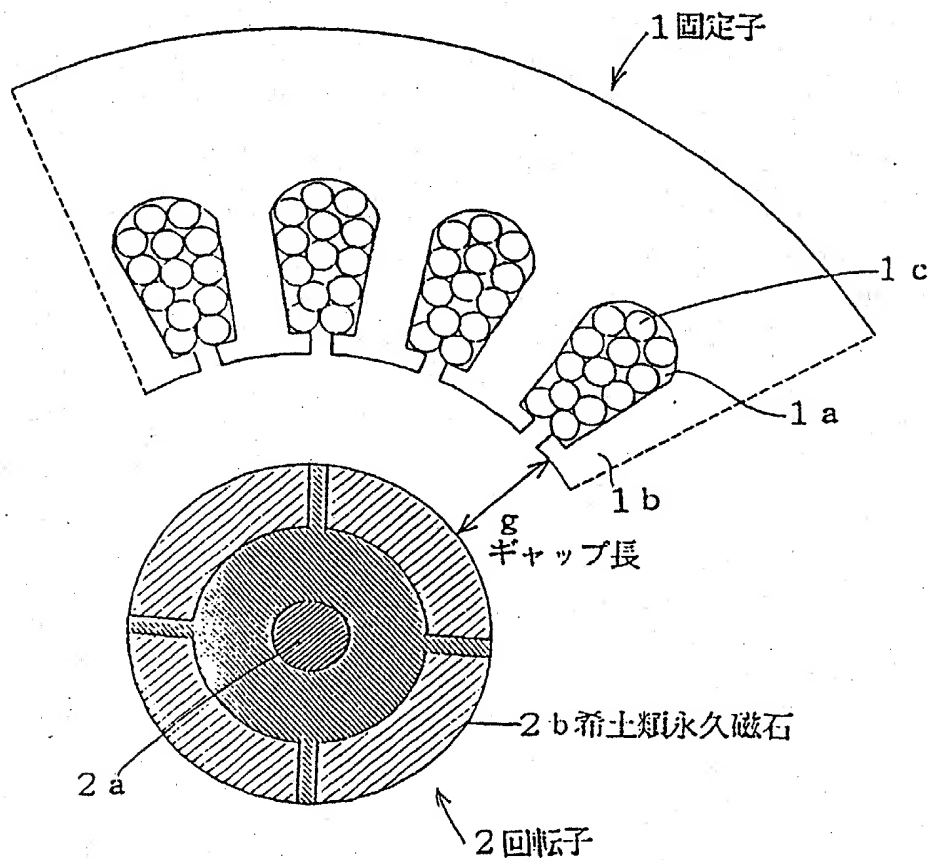


5/6

第7図



第8図



6/6

## 第9図

